

Sesión sobre Seguridad: Ponencia General 2: **LAS TRAMPILLAS PARA EXTRACCION DE HUMOS EN EL TUNEL DE SOMPORT.**

Por D. ME. Alarcón Alvarez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid
Director del Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM)

1. INTRODUCCION

Las posibilidades de las técnicas constructivas actuales han provocado una evolución en el proyecto de túneles de carretera semejante a la que hace un par de décadas se produjo con los puentes: estas obras han dejado de condicionar el trazado y, dentro de ciertos límites, son consecuencia de las condiciones de confort de tráfico. Ello implica que haya aumentado la proporción de túneles largos y, en consecuencia, que se planteen de forma habitual problemas que hasta hace pocos años no existían debido al limitado tamaño y tráfico de las obras.

En particular como se ha puesto de manifiesto en otras comunicaciones (1), la seguridad frente a los casos de incendio ha pasado a ser un requisito fundamental en los proyectos de ventilación y ello tanto en cuanto a dispositivos complementarios: nichos, refugios, detección, etc. como en lo referente al propio concepto del sistema escogido y al plan de actuación pertinente cuando el incendio se produce. En este sentido cabe indicar, que hasta fechas relativamente recientes, los planes de control automático de la ventilación se limitaban a aconsejar si se producía un incendio "apagar los ventiladores y devolver el control al mando manual". El reciente análisis del comportamiento de los sistemas de seguridad en el túnel de El Canal de La Mancha ha puesto de manifiesto (2) que incluso en una obra tan

singular los responsables del Centro de Control se encontraron sin capacidad de reacción para actuar de forma refleja, lo que pone de manifiesto que la seguridad frente al incendio sigue necesitando una investigación desde todos los puntos de vista posibles.

En este artículo se trata un aspecto del mecanismo proyectado para la extracción de humos generados en un posible incendio en el Túnel de Somport

Tras una somera descripción del sistema de ventilación y extracción se comentan los métodos de modelado que han servido para dimensionar la solución y en particular se pone de manifiesto la utilidad que los simuladores numéricos, dentro de todas las limitaciones que todavía presentan, pueden tener para la formación del personal encargado del control y para seleccionar estrategias de actuación que puedan aplicarse de forma automática en caso de accidente.

2. EL SISTEMA DE VENTILACION DEL TUNEL DE SOMPORT

Como se ha descrito en diferentes lugares, el túnel de Somport tiene una ventilación semitransversal (figura 1) organizado en siete cantones de unos 1200 m. de longitud y tres estaciones de ventilación: dos en las bocas y otra en una posición intermedia.

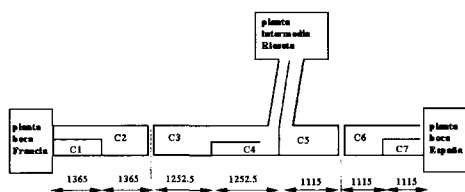


Figura 1.. Distribución de cantones para ventilación semi-transversal en Somport.

En la sección transversal (figura 2) se observa que el falso techo se halla subdividido en dos conductos por los que en condiciones normales de explotación circula aire limpio. Se observa también la existencia de trampillas telecomandadas que constituyen un detalle clave en caso de incendio. Cuando ello sucede se procede a la parada de los ventiladores de aire limpio, a la apertura de las trampillas y a la conexión de un ventilador de aspiración específico del cantón afectado, mientras que se inyecta aire fresco en los cantones vecinos para impedir el avance de los humos.

La capacidad de extracción de cada cantón está alrededor de los 100 m³/s y cada trampilla tiene una superficie relativamente grande (unos 1.5 m²) en comparación con el de las boquillas utilizadas en el sistema transversal.

El uso de estas grandes trampillas permite concentrar la extracción justamente en la zona del incendio con gran efectividad.

Como se ve si se dispone la apertura de cinco trampillas la velocidad de extracción estaría alrededor de los 13 m/s.

Surgen diversas cuestiones relacionadas con el proyecto de estas instalaciones: tamaño, forma y posición en la sección transversal, distancia entre trampillas, etc. Esta última es especialmente importante pues refleja la extensión esperada de los humos. Una idea se puede obtener si se piensa en un tiempo de reacción de unos tres minutos y una velocidad del aire de unos 2 m/s antes de proceder a su reducción. En estas condiciones habrá 360 m. llenos de humo cuando

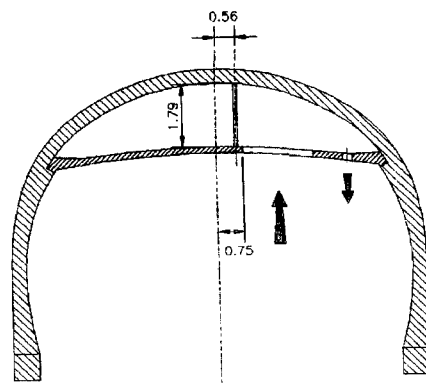


FIGURA 2. Sección transversal del túnel de Somport

comience la extracción, de modo que si se abren las 5 trampillas más próximas a estos humos se tienen interdistancias del orden de los 100 m. De hecho esta es la recomendación establecida en la Revisión que se está proponiendo para la Circular francesa 81109 del 29 de Diciembre de 1981 (5).

También es del mayor interés la selección de un mecanismo de apertura y cierre de las trampillas suficientemente estanco para garantizar el funcionamiento del sistema y lo bastante resistente a las altas temperaturas para que sea posible la apertura y cierre de trampillas según la evolución de los humos. En Somport se exige una resistencia de 400° C durante 1 hora.

En el apartado siguiente se describen los métodos, de diferentes tipos, que han sido utilizados durante el desarrollo del proyecto del sistema y que dan una idea del esfuerzo que se ha dedicado a este aspecto de la seguridad de la explotación.

3. MÉTODOS DE ESTUDIO Y CÁLCULO

Para dimensionar el sistema del Somport se ha aprovechado toda la experiencia del Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) pero se

han desarrollado también nuevos estudios tanto por parte española como francesa, con objeto de ajustar la solución a las características específicas del túnel. En particular las decisiones se han tomado tras el análisis de modelos físicos, modelos numéricos y ensayos a escala real en túneles semejantes, tal como se indica a continuación.

3.1. MODELOS FÍSICOS

Los ensayos en modelos físicos representan un recurso tradicional en la mecánica de fluidos, especialmente cuando se presentan condiciones complicadas de tipo geométrico. El estudio básico del comportamiento de trampillas de extracción es debido a P. Chassé y D. Lacroix (6) y representa la guía más completa sobre la importancia de varios parámetros.

El esquema de ensayo puede verse en la figura 3a donde se observa que se trata de un tubo rectangular de plexigles de 17 m. que simula a escala 1/15 una longitud de 250 m. con 4 trampillas y diferentes boquillas. El humo se modela con una mezcla de helio y nitrógeno que, respecto al aire, permite representar las diferencias de densidades que es el efecto que se considera definitivo. Se obliga la conservación estricta del número de Froude que relaciona las fuerzas de inercia y de boyancia y el número de Reynolds se mantiene alto para conseguir régimen turbulento, pero no se conserva.

Existe además un extractor que introduce una corriente de aire puro bajo la capa de humo que, figura 3b, se considera estratificada. Según se describe en (6) se llevaron a cabo 130 ensayos de extracción en diferentes condiciones referidas al lugar de colocación de las trampillas, su forma, disposición respecto al eje del túnel, interdistancias, etc. Las principales conclusiones del trabajo son:

- a) Es importante la superficie de trampilla siendo secundaria su forma
- b) Son más efectivas las trampillas situa-

das en falso techo que las colocadas en cámaras laterales.

- c) Si la trampilla está descentrada es conveniente colocar su mayor dimensión perpendicularmente al eje del túnel.
- d) La distancia más efectiva se sitúa entre los 50 m. y los 100 m. siendo aconsejable la primera cifra para túneles urbanos.

Obsérvese que la dificultad del problema impone simplificaciones de cierta importancia entre las que cabe destacar la hipótesis de humo perfectamente estratificado o la no conservación del número de Reynolds. No obstante se trata de un trabajo de valor considerable y que ha dirigido las decisiones tomadas en Somport.

3.2. MODELOS NUMÉRICOS

El desarrollo de las computadoras y de los métodos numéricos de cálculo ha permitido afrontar problemas de mecánica de fluidos de difícil resolución hasta hace una década. En el caso de simulación de incendios la dificultad es formidable ya que se trata de estudiar el régimen transitorio del fluido acoplado a un problema de combustión, lo que implica fuertes intercambios de calor con el entorno, y sobre todo régimen turbulento cuya descripción a nivel numérico tiene grandes dosis de empirismo (7). A todo ello debe sumarse el acoplamiento con los vehículos en movimiento que van frenando dentro del túnel e inciden decisivamente en la evolución de velocidades. Como es de imaginar para resolver estas dificultades se han planteado estrategias de diferentes niveles de complejidad que ofrecen resultados complementarios; generalmente todos los métodos tienen puntos débiles que hacen que los resultados no puedan ser aceptados al detalle, pero las conclusiones cualitativas que pueden obtenerse con ellos permiten acotar incertidumbres y emitir recomendaciones basadas en criterios racionales.

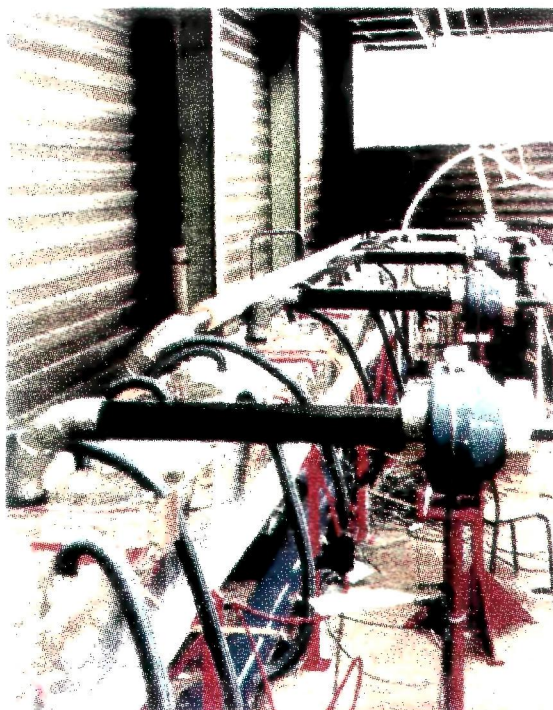


Figura 3(a) y (b) (según referencia (6)). Ensayos con modelos físicos.

Los modelos utilizados habitualmente pueden clasificarse en tres grupos: modelos monodimensionales, modelos zonales y modelos tridimensionales. Se han hecho intentos, vg (8), de reducir estos últimos a dominios bidimensionales pero las hipótesis adicionales necesarias no justifican la reducción en el esfuerzo de cálculo.

En los modelos monodimensionales se supone que las variables sólo dependen del emplazamiento longitudinal, es decir, se admite que en cada sección las propiedades son homogéneas. Ello impide representar fenómenos como la estratificación de humos, pero a cambio permite el seguimiento del frente del humo y su acoplamiento con modelos de tráfico con la facilidad suficiente para que sea posible la repetición para un gran número de casos, y en consecuencia, la extracción de criterios para el control de la ventilación en caso de incendio.

Desde el punto de vista del proyecto son los métodos mínimamente exigibles para justificar la adecuación del sistema de ventilación proyectado a los casos de accidente. Desde el punto de vista del control son los métodos adecuados para definir pautas sencillas de actuación que permitan guiar a los responsables del Centro de Control en los primeros minutos de desconcierto y permitir así una actuación posterior adecuada a las particularidades del momento. Finalmente estos modelos son de ayuda también para

obtener condiciones de contorno que luego se aplican a modelos tridimensionales más refinados.

Las ecuaciones acopladas a resolver son las de la cantidad de movimiento, el transporte (convección-difusión) y la propagación del calor. Con la primera se establece el equilibrio entre las fuerzas de inercia, las de rozamiento en las paredes, impulso y arrastre de vehículos, y permite ir calculando en cada instante la velocidad en cada sección. Con la segunda se estudia la propagación del contaminante escogido, humo y CO generalmente. Para ello se precisa la introducción de fuentes que simulen ambas emisiones basándose, por ejemplo, en datos experimentales (9). Finalmente con la última se representan las pérdidas de calor por conducción y convección, arrastre, etc. lo que permite calcular las variaciones de densidad y mediante un proceso iterativo con las ecuaciones anteriores llegar a situaciones compatibles. El término fuente en este caso es la curva de evolución de las temperaturas con el tiempo.

Puesto que las trampillas pueden ser abiertas o cerradas, a lo largo del proceso de simulación se precisa una malla variable lo que implica un método de cálculo robusto desde el punto de vista matemático si es que esas aperturas y cierres se modelan mediante pérdidas de carga variables.

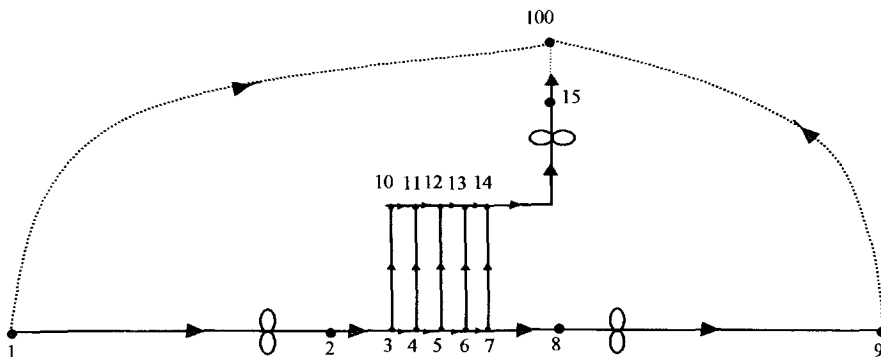


Figura 4. Modelo de cálculo para el túnel de Somport.

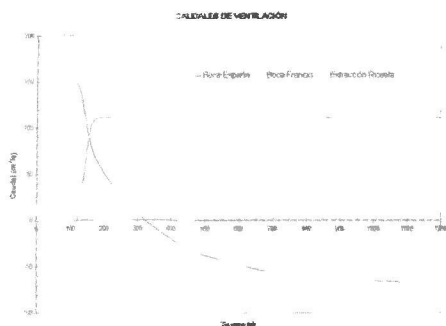


Figura 5. Evolución de caudales.

Un ejemplo de los modelos considerados en el caso de Somport se indica en la figura 4. Aquí se ha limitado el estudio a uno de los cantones y en la malla sólo se han representado las cinco trampillas que se abren alrededor del foco.

Se supone que el fuego provoca la interrupción total de la calzada por lo que el tráfico se va deteniendo a ambos lados del fuego. Este tiene una potencia de 20 MW correspondiente al incendio de un autobús. A los 2 minutos del incendio se conecta el ventilador de extracción del cantón siniestrado mientras que se ayuda insuflando aire desde el resto de los cantones.

La figura 5 muestra la evolución de caudales con el tiempo tanto en el túnel como en el conducto de extracción. Refleja la parada progresiva de vehículos y el efecto de la extracción que invierte la ventilación aguas abajo del incendio. Finalmente se extrae un caudal de 110 m³/s.

La figura 6 por su parte, es una representación en el diagrama espacio-tiempo de la evolución de los humos mediante curvas de coeficiente de extinción constante. En la figura 6a se ha representado la nube correspondiente al caso en que no se toma ninguna medida. Puede verse que la masa de humos inunda la zona aguas abajo del foco lo que impide la evacuación de los usuarios inmovilizados por el incendio. Por el contrario en la figura 6b se observa el reflujó de la masa de humos que permite el escape hacia

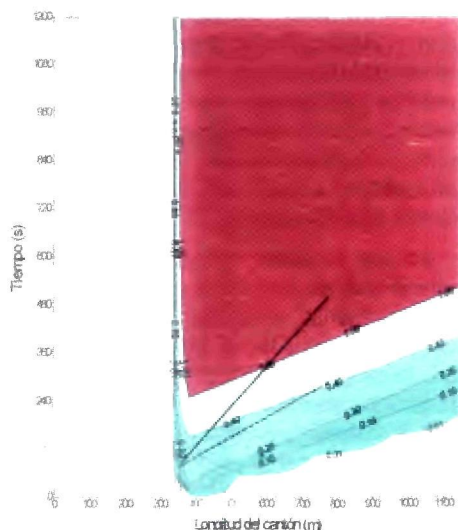


Figura 6(a). Coeficiente de extinción. Resultados sin actuación.

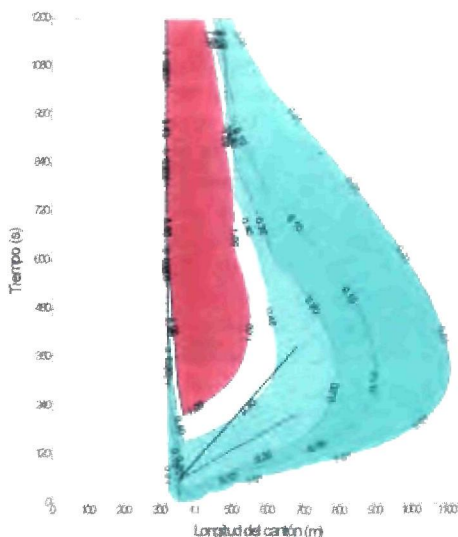


Figura 6(b). Coeficiente de extinción. Extracción con trampillas.

los refugios. Sobre el mismo gráfico se han representado líneas de velocidades de 1 y 2 m/s representativas del paso de los usuarios. Si se considera que la reacción de escape de los situados al lado del fuego se produce a los 2 minutos, es posible observar que en las condiciones impuestas alcanzarían los refu-

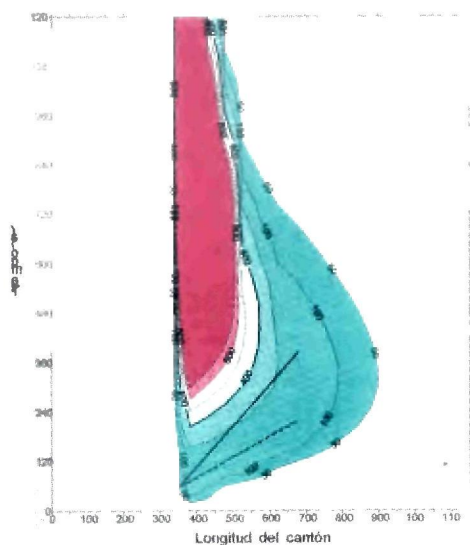


Figura 7(a). Concentración de CO. Extracción con trampillas.

gios sin ser sometidos a un coeficiente de extinción superior al $K=0.4$ que se considera límite para el movimiento en el interior de la masa de humo.

Por otro lado en la figura 7a se dibujan las isolíneas de CO para el caso 6b lo que permite observar las dosis de CO recibidas en el trayecto de escape mencionado (fig. 7b) y compararlo con las admisibles.

Este ejemplo muestra las posibilidades del método para intentar fijar las distancias de los refugios o vías de escape. En la referencia (10) se incluye un ejemplo de otro de los usos mencionados: el establecimiento de pautas de actuación para los responsables del control de la ventilación.

Frente a la sencillez relativa de los modelos monodimensionales y su limitada información, los modelos tridimensionales ofrecen la posibilidad de obtener detalles del flujo a costa de una complicación de la formulación y un coste computacional mayor. La referencia (11) recoge tanto el planteamiento matemático del modelo numérico como algunos ejemplos relacionados con la ventilación en los túneles de El Padrún (12). En estos modelos, además del enorme tiempo de cál-

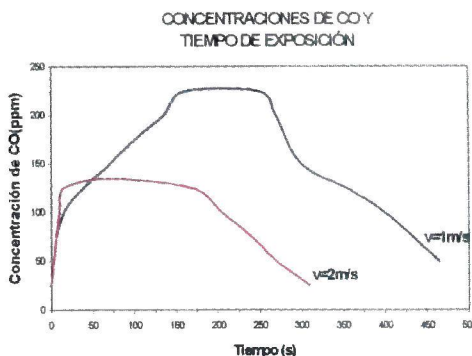


Figura 7(b). Dosis de CO recibidas.

culo requerido, es complicado el acoplamiento con el tráfico y el volumen de datos obtenido hace difícil la interpretación de los resultados.

En el caso del Somport los modelos tridimensionales se utilizaron para buscar una distancia óptima entre trampillas. Para ello se construyeron mallas con trampillas situadas a distancia de 50, 100 y 200 m. y se estudió la efectividad de las diferentes disposiciones en relación con el porcentaje de contaminación extraído (ref. 13). La figura 8 representa las 2400 celdas utilizadas en un modelo de 300 m. de longitud con trampillas simuladas mediante pequeñas chimeneas para evitar la discretización del conducto de extracción.

La figura 9a muestra las concentraciones de contaminante en la sección transversal bajo la segunda trampilla y en la 9b la distribución observada en planta a una altura de 4 m. sobre el suelo.

En la (ref. 13) se incluyen más detalles sobre el estudio que condujo a la selección de una interdistancia de 100 m. como solución de compromiso entre la efectividad hidráulica, el proceso constructivo y el coste.

3.3 ENSAYOS IN-SITU

Con objeto de mejorar el conocimiento se suelen completar los estudios anteriores con ensayos in-situ (14) que permiten validar los

cálculos realizados y extraer conclusiones respecto a las medidas a tomar en situaciones de emergencia. En el caso del Somport se intentó completar el conocimiento sobre el funcionamiento de trampillas aprovechando los ensayos con fumíferos de humos fríos y calientes que debían realizarse en el túnel de Fréjus (15). La figura 10 recoge la forma de las trampillas y los dispositivos de actuación en ella previstos.

Como puede observarse se trata de un motor, capaz de funcionar a 200°C durante 90 minutos, que actúa sobre un eje (fig. 10a) encargado de desplazar la trampilla entre las posiciones abierta y cerrada. Además este movimiento se acopla con un sencillo mecanismo de apriete (fig. 10b) que asegura la impermeabilidad en la posición de cierre. Se observa también una reja de protección para evitar el paso de proyectiles arrastrados por el aire (fig. 10c)

La figura 11 recoge la disposición de los fumíferos fríos. Se trata de baterías de botes de humo que se abren de forma controlada para garantizar un caudal de 20 m³/s de humo durante 20 minutos.

Debido a la falta de estratificación térmica este ensayo es un buen test del funcionamiento para situaciones homogéneas en la sección transversal.

La figura 12 representa el foco de humos calientes, formado por una bandeja donde se quema heptano a velocidad controlada para simular la potencia de incendio deseada. La figura 13a muestra la protección del revestimiento del túnel mediante un textil ignífugo de fibra de carbono y la 13b alguno de los detalles usados en las mediciones. La técnica es la misma que la empleada en los ensayos EUREKA (ref. 9) y permite estudiar la efectividad de los dispositivos de extracción.

4. CONCLUSIONES

Aunque los estudios precitados se han limitado al túnel de Somport cabe extraer de ellos algunas conclusiones de tipo general.

En primer lugar cabe afirmar que la extracción de humos mediante trampillas es una *solución excelente* que será utilizada más a menudo en el futuro. Su éxito, sin embargo, depende de la capacidad de desarrollar mecanismos capaces de funcionar en condiciones de temperaturas muy altas. Hasta el momento se han propuesto soluciones ad-hoc lo que sugiere que existe un campo prometedor para la innovación industrial. Los prototipos que se desarrollen serán imprescindibles en futuros proyectos.

En cuanto a los *métodos de estudio* existentes no parece disponerse de una solución definitiva. Métodos numéricos y modelos físicos, a escala o in-situ, tienen sus limitaciones y sus ventajas. Puede decirse que se trata de enfoques complementarios y que todos deben usarse cuando la importancia de la obra lo justifique. Ello implica que estos estudios son costosos pero imprescindibles hasta que el estado del conocimiento alcance un nivel suficiente para sintetizar un método único de comprobación.

Desde el punto de vista del *proyecto* cabe indicar la necesidad de que los cálculos no se limiten al dimensionamiento de los elementos de ventilación sino que incluyan *pautas de actuación sencillas* que puedan ser seguidas de forma refleja por los responsables del Centro de Control en los primeros momentos del incendio ya que ello es clave en el éxito del proceso de evacuación. En este sentido es perentorio el desarrollo de *simuladores numéricos* que puedan ser utilizados en el entrenamiento y formación de los operadores del Centro de Control.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea hacer constar su agradecimiento a los responsables de la Dirección General de Carreteras del MOPTMA, así como a los ingenieros de las diferentes Demarcaciones que le han empujado a estudiar estos temas. En el caso del Somport se ha contado con el estímulo y amistad constante del ingeniero D. Rafael López Guarga

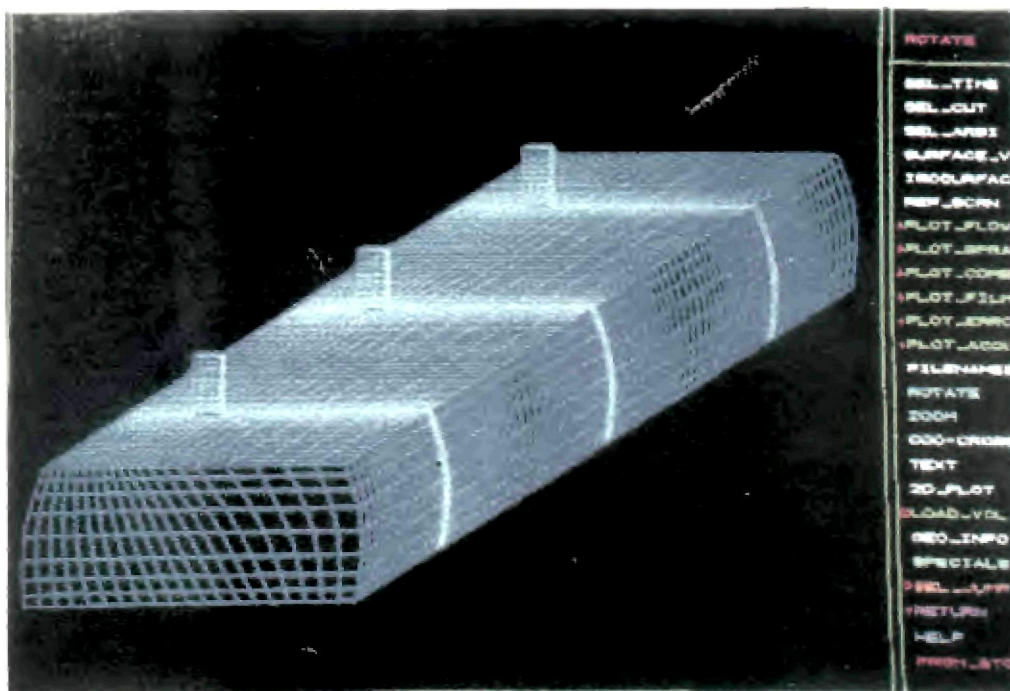


Figura 8. Modelo con trampillas.

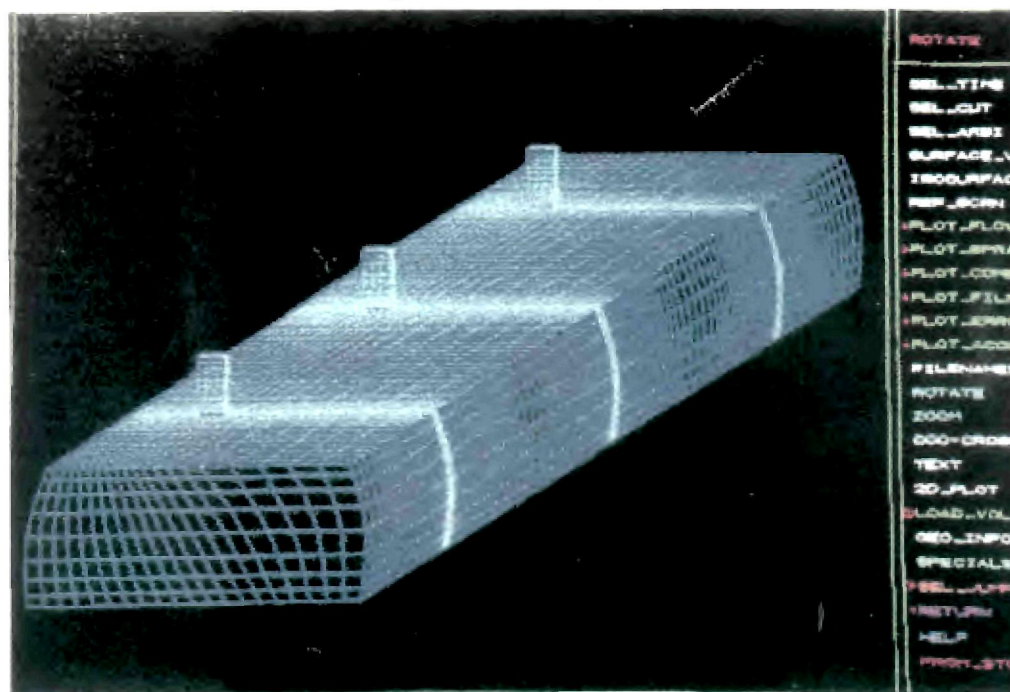


Figura 9(a). Concentración de contaminantes en planta en sección transversal.

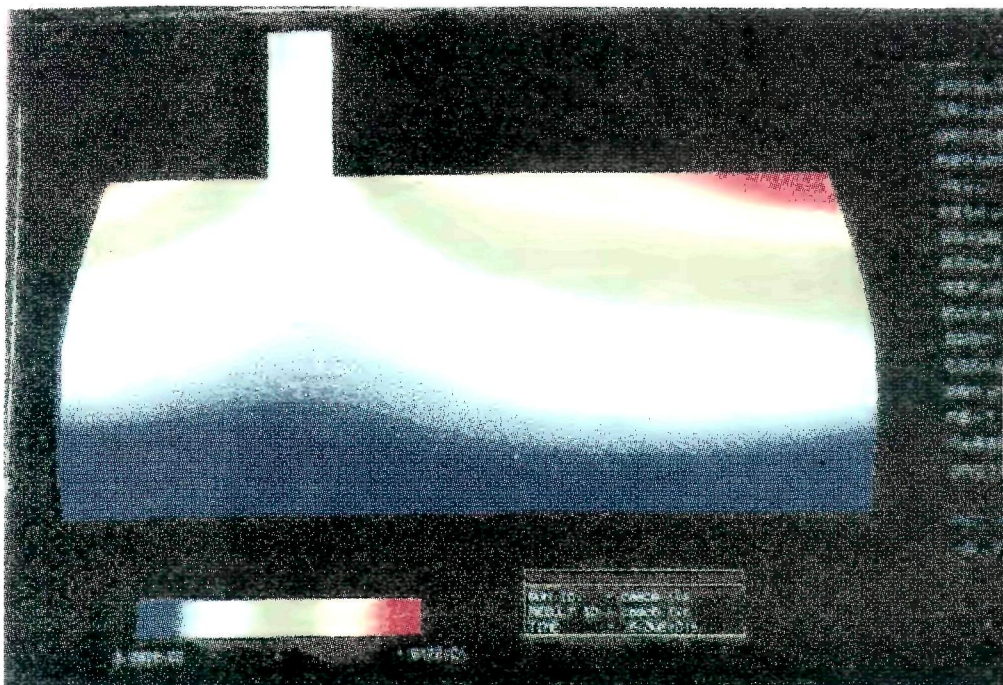


Figura 9(b). Concentración de contaminantes en planta.

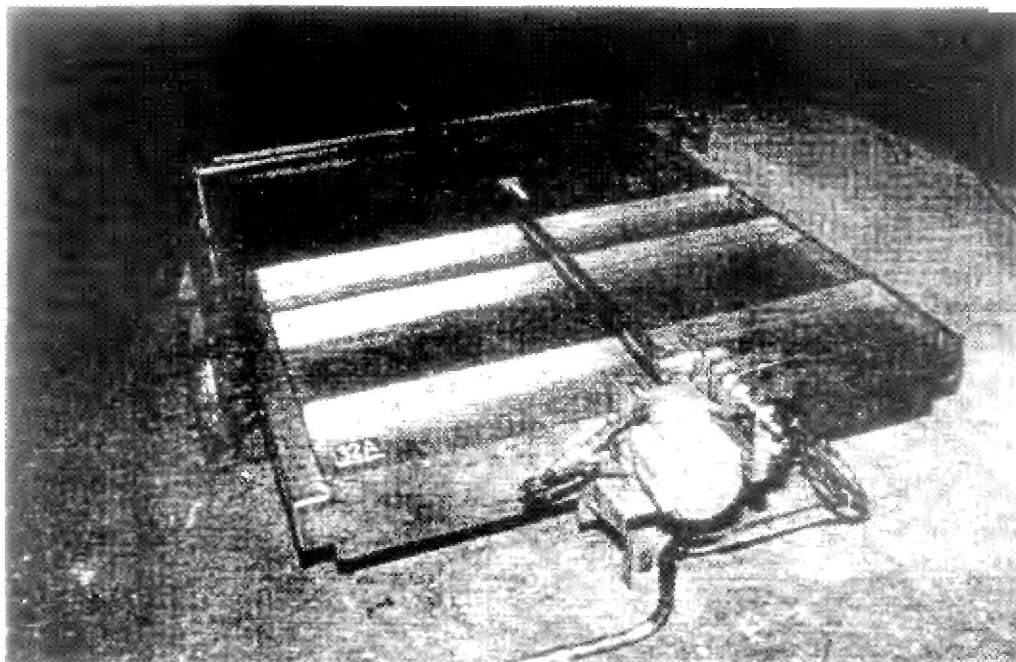


Figura 10(a). Vista de la trampilla desde el conducto de extracción. Motor de actuación sobre el vástago.

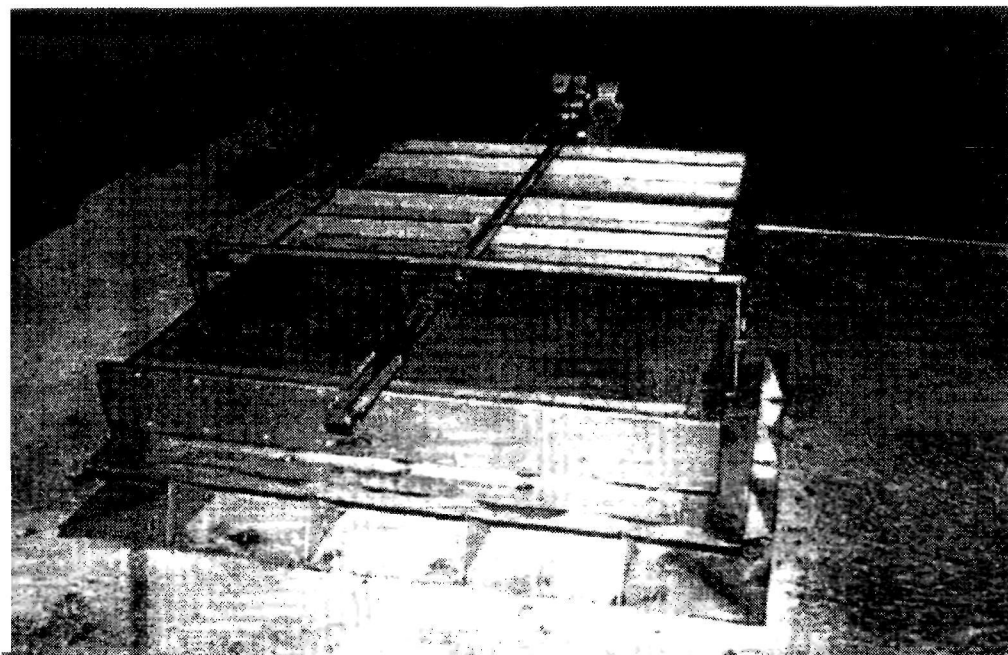


Figura 10(b). Vista de la trampilla desde el conducto de extracción. Vástago y mecanismo de apriete.

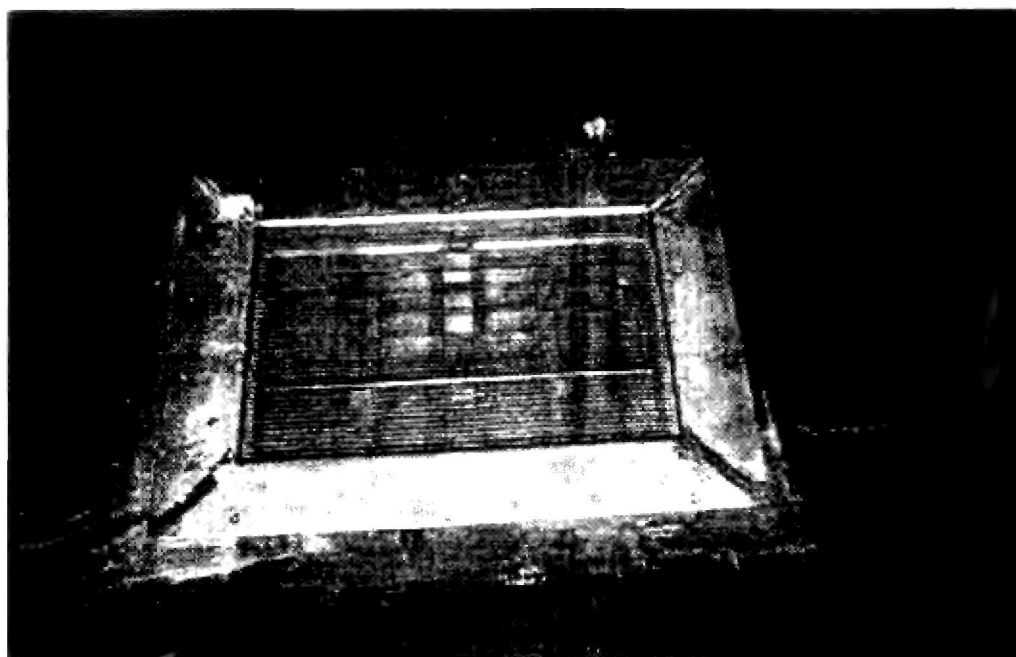


Figura 10(c). Vista de la trampilla desde el túnel.

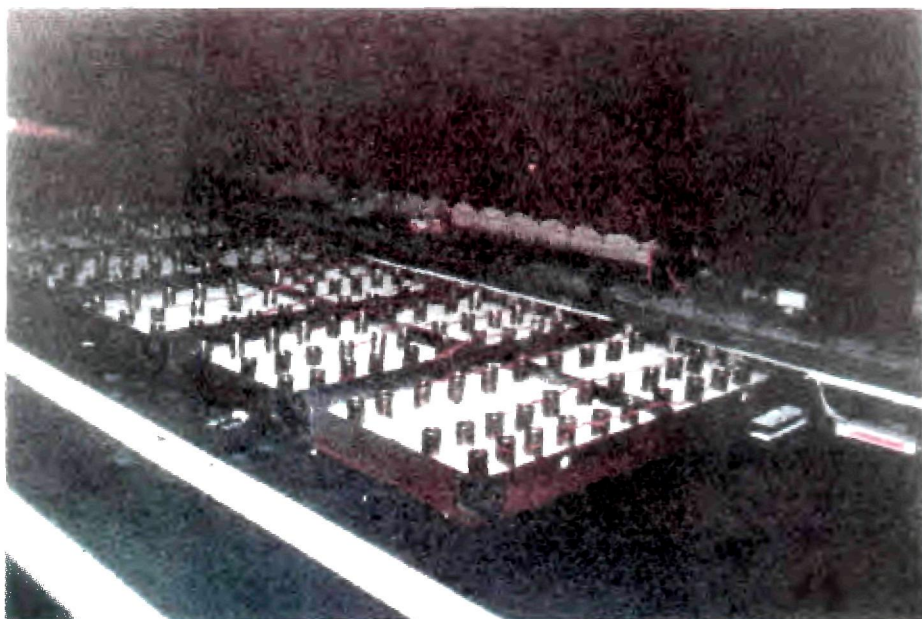


Figura 11. Fumíferos fríos para ensayo in-situ.



Figura 12. Foco de humos calientes para ensayo in-situ.

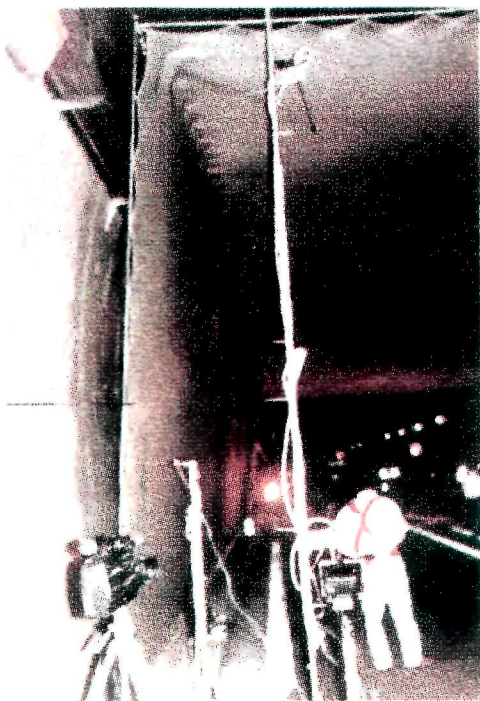


Figura 13(a). Protección del revestimiento del túnel durante ensayo.

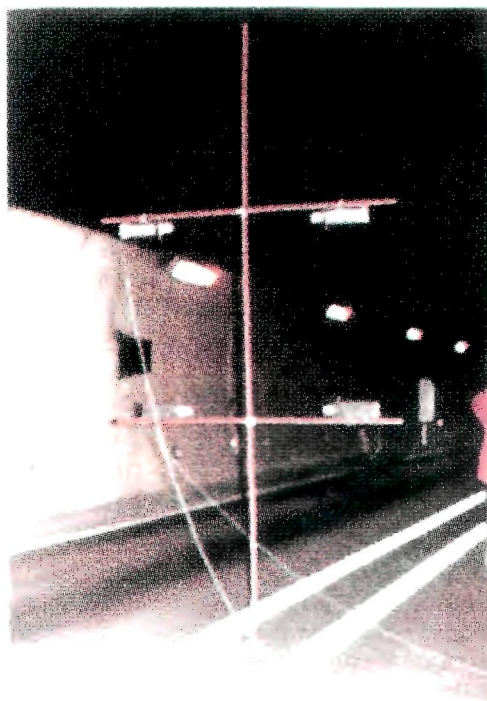


Figura 13(b). Material usado en las mediciones.

pero también es de justicia señalar las fructíferas discusiones con los representantes del CETU y en especial con el ingeniero D. Claude Moret cuya experiencia y conocimientos sólo son comparables a su calidad humana.

6. REFERENCIAS

1. R. López Guarga. "Seguridad en túneles de carretera de gran longitud" ~En este simposio), 1998
2. R. Lejuez. "Les enseignements de l'incendie dans le tunnel sous la Manche". La sécurité dans les tunnels routiers. P.F.E. 1997
3. R. López Guarga, J. Lanz Muniain. "El túnel de Somport". Cauce 76; JulioAgosto 1996
4. R. López Guarga, J. Lanz Muniain. "Concepción, construcción y aspectos medioambientales del túnel de Somport". Revista Obras Públicas. Ingeniería Subterránea 1, n° 42, 1998
5. M. Marec, U-CI Vergnault. "Le project de circulaire interministérielle sur la sécurité dans les tunnels routiers". La sécurité dans les tunnels routiers. P.F.E. 1997
6. D. Lacroix, P. Chasse. "Etude sur maquettes aerauliques des systemes de trappes de desenfumage en tunnel routier". CETU, 1994
7. P. Woodburn. "Computational fluid dynamics simulation of fire-generated flows in tunnels and corridors". Tesis doctoral. Universidad de Cambridge, 1995
8. N. Kawabata, H. Ohashi, Y. Kato. "Numerical simulation of fire fume propagation along the ceiling of a downgrade tunnel". Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels. Ed. A. Haerter. Elsevier, 1991
9. E. Ivarson (ed). "Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels". Swedish Nat. Testing & Res. Inst. 1994
10. B. Martín, M.P.Retana, A. Fraile, I. Del Rey, E. Alarcón. "Modelos numéricos para estudio de incendios en túneles con ventilación longitudinal". (En este simposio), 1998.
11. L. Mochón, J. Hernández, A. Crespo, E. Alarcón. "Algunos problemas en la ventilación de

- túneles de carretera". Jornadas Técnicas sobre Túneles, MOPTMA, Gijón, 1994
12. I. Ga. Arango. "Los túneles de El Padrún". Jornadas Técnicas sobre Túneles, MOPTMA, Gijón, 1994
 13. R. López Guarga, L. Mochón, A. Martínez, E. Alarcón. "Modelos numéricos para la simulación de incendios en túneles con ventilación semitransversal y trampillas de extracción". (En este simposio), 1998.
 14. Hacar, A. Abella, I.Ga Arango. "Fuego en túneles". Ed. Paraiso, 1994
 15. L. Mochón, E. Alarcón. "Ensayos de evacuación de humos en el túnel de Frejus". Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación (SINEX, S.A.)